

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ТИМОШЕНКО АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.78.062:621.791.725: 621.74.047

**ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИЙ ПРОЦЕС ОТРИМАННЯ
ШИРОКОЇ ГАМИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі концентрованих енергетичних впливів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Лихошва Валерій Петрович,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України,
завідувач відділу концентрованих енергетичних впливів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осипенко Василь Іванович,
Черкаський державний технологічний університет,
завідувач кафедри проектування харчових виробництв та
верстатів нового покоління

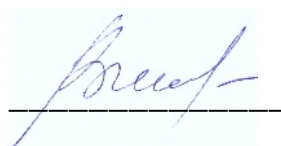
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Хаскін Владислав Юрійович,
Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «16» листопада 2020р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», за адресою: 02000, м. Київ, вул. Політехнічна, 39, корпус 23, ауд. 216.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «13» жовтня 2020р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, доцент



Пащенко В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки виникла потреба в нових нетрадиційних матеріалах з підвищеними трибологічними і фізико-механічними властивостями та в створенні технологій виробництва деталей і машин. Удосконалення технологічних процесів одержання композиційних матеріалів (КМ) є однією з найважливіших умов промислового виробництва. Актуальною проблемою при цьому постає розробка нових високоефективних способів отримання КМ як на основі традиційних ливарних технологій: інфільтрації, осадження, так і принципово нових схем з використанням концентрованих джерел енергії, наприклад, лазерного випромінювання. Крім того, для задоволення постійно зростаючих потреб необхідно розробляти такі технології отримання КМ, які дозволяють легко управляти всім комплексом фізико-механічних характеристик нового матеріалу, що прямо залежать від теплових, гідро- і газодинамічних параметрів процесу отримання КМ.

Найбільш перспективним напрямком є розробка нових гібридних методів отримання литих дисперсно-армованих КМ, що дозволяють поєднати переваги використання концентрованих джерел енергії з високоефективними традиційними ливарними технологіями, а також створення спеціалізованих пристроїв для практичної реалізації даного процесу. Рішення такого складного завдання, як в науковому, так і в технічному відношенні проблеми неможливе без проведення комплексу теоретичних досліджень, математичного опису та комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів формування суспензійного розплаву при взаємодії лазерного випромінювання з частинками в газопорошковому потоці, що і є центральним завданням цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України в рамках Державних науково-технічних програм «Розробка методів одержання та дослідження закономірностей формування багатошарових виробів на основі ливарних технологій і висококонцентрованих джерел енергії» (№ ДР 0111U000081, 2011-2013 рр.); «Дослідження особливостей формування багатошарових виробів на основі ливарних методів та фізико-хімічної обробки, в тому числі з композиційними шарами при різних методах їх одержання» (№ ДР 0112U001231, 2012-2016 рр.); «Розробка науково-технологічних основ отримання багатокомпонентних і композиційних сплавів і виробів з них на основі ливарних процесів з використанням концентрованих джерел енергії» (№ ДР 0214U002121, 2014-2016 рр.); «Створення науково-технічних засад одержання композиційних матеріалів та багатошарових виробів з використанням високотемпературних та електромагнітних дій на метал» (№ ДР 0117U002602, 2017-2019 рр.); науково-дослідної роботи молодих учених НАН України «Розробка гібридного ливарно-лазерного методу отримання литого композиційного матеріалу» (№ ДР 0117U003436 2017-2018 рр.), «Розробка новітнього гібридного-СВС методу отримання біметалевих елементів конструкцій обладнання для будівельної та гірничодобувної промисловості з подовженим терміном експлуатації» (№ ДР 0116U006495 2016-2020 рр.), науково-дослідної роботи для молодих вчених НАН України «Створення науково-технологічних засад отримання дисперсно-зміцнених литих композиційних матеріалів з використанням концентрованих джерел нагріву» (№ ДР 0119U102363 2019-2020 рр.).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – безперервне отримання литого

композиційного матеріалу методом формування суспензійного розплаву, армованого металевими (неметалевими) частинками, нагрітими концентрованим джерелом енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків відомих способів отримання литого дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу (КМ) та визначити межі його раціонального застосування.

2. Розробити метод безперервного отримання литого дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу в основу якого покладено використання ливарних процесів і лазерної обробки. Обґрунтувати необхідність використання лазерної обробки частинок в ливарних процесах при безперервному отриманні дисперсно-армованих КМ. Дослідити та описати технологічні схеми безперервного формування суспензійного розплаву з подальшим отримання композиційного та пористого матеріалу.

3. Провести теоретичні і експериментальні дослідження теплових, газо- і гідродинамічних процесів утворення суспензійного розплаву в реакторі змішування. Оптимізувати геометричні параметри реактора та технологічні режими процесу отримання КМ.

4. Розробити та дослідити методи замішування металевих та неметалевих частинок в розплав. Створити найбільш оптимальні термодинамічні умови для формування суспензійного розплаву.

5. Виконати розробку технологічного обладнання для гібридного лазерно-ливарного методу отримання КМ.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси отримання литого композиційного матеріалу з застосуванням лазерного випромінювання.

Предмет дослідження – закономірності термо-, гідро- та газодинамічні процесів безперервного формування суспензії в рухомому потоці металевого розплаву в умовах комплексної дії кількох джерел енергії з метою отримання дисперсно армованого композиційного матеріалу.

Методи дослідження включали аналітичну оцінку наявної науково-технічної інформації та теоретичні дослідження з проблем отримання литого композиційного матеріалу, металографічний, мікрорентгеноспектральний аналізи, механічні випробування, фізичне і математичне моделювання, натурні експерименти.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі проведено комплексні дослідження процесів формування литих композиційних та пористих матеріалів з використанням лазерного випромінювання. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано лазерно-ливарний метод безперервного отримання дисперсно-армованих КМ з оптимальним співвідношення композиційної складової (до 10% в об'ємі) на основі формування суспензійних розплавів у проточних реакторах змішування з різними умовами змішування (накладання відцентрових сил або вимушеного перемішування), та доведено необхідність використання лазерного випромінювання для нагріву частинок в газопорошковому потоці, що дозволяє отримати якісний зв'язок між армуючими елементами і матрицею литого КМ.

2. З метою реалізації безперервних процесів в реакторах змішування при наповненні-зливу рідини, збурення її поверхні газопорошковим потоком та

додаткових умовах накладання зовнішніх сил впливу на розплав (механічного обертання реактора (в інтервалі 0-160 об/хв) та тиску) визначено, що оптимальною формою твірної поверхні реакторів є крива у вигляді еліптичного параболоїду обертання. Для різних реакторів змішування вперше отримано залежності зміни форми поверхні рідини, яка піддається впливу газолазерного та рідинного потоків від витрати газу, швидкості подачі та обертання рідини.

3. Показано, що керування розташуванням фокусу лазерного випромінювання відносно перетяжки газопорошкового потоку дозволяє змінювати інтенсивність та тривалість лазерної обробки частинок. Визначено, що форма газопорошкового потоку впливає на геометричні розміри каверни і ступінь розсіювання частинок по поверхні розплаву, що залежать від конструкції фурми та її розташування відносно поверхні розплаву.

4. Встановлено особливості конвекційного, лазерного та їх сумісного нагріву (металевих і неметалевих) частинок в газопорошкових потоках, в залежності від потужності лазерного випромінювання, траєкторії руху, лінійної та кутової (власного обертання) швидкості, їх фізичних параметрів та розмірів. Вперше доведено, що додаткове накладання газо-полум'яного джерела нагріву (застосування горючої суміші газів «повітря-пропан») спільно з лазерною обробкою дозволяє:

- підвищити ефективність використання лазерного випромінювання;
- збільшити на 20-30% загальну температуру частинок;
- розширити інтервал керування їх нагрівом;
- створити захисне середовище на умовах сформованої течії газових продуктів реакції горіння в області від фурми до поверхні розплаву.

5. На основі лазерно-ливарного методу отримання КМ вперше розроблено механізм одержання пористого матеріалу з рівномірно розподіленою пористістю (5-17%). Механізм базується на взаємодії нагрітих лазерним випромінюванням газонасичених частинок з розплавом, в процесі якої відбувається їх повне або часткове розчинення з виділенням газу, який стає центром пороутворення в матриці матеріалу. Встановлені закономірності зміни кількості та розмірів пор в залежності від швидкості кристалізації розплаву.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено технологічне обладнання для реалізації лазерно-ливарного методу отримання литого композиційного матеріалу на основі кольорових сплавів.
2. Створено нові конструкції реакторів змішування, де відбувається безперервне формування суспензії, для різних технологічних прийомів перемішування розплаву та армуючих частинок.
3. Розроблено конструкцію фурми для лазерної обробки газопорошкового потоку з додатковим нагрівом частинок (діаметром 150 мкм, 315 мкм і 500 мкм) та розплаву газополум'яним джерелом енергії, яке забезпечує створення захисного середовища.
4. Визначено оптимальні режими лазерного нагріву металевих та неметалевих частинок, які дозволяють забезпечити їх часткове оплавлення.
5. Отримано нові КМ на основі алюмінієвого сплаву АК7 з металевими вclusions армуючих частинок Р6М5 та бронзи Бр. ОЦС 5-5-5 з частинками зі сталі марки Сталь 20.
6. Одержано експериментальні зразки пористого матеріалу на основі сплаву АК-7 з рівномірно розподіленою пористістю.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі особисто автором: проаналізовано та вивчено наукову літературу з теми дисертації; проведено фізичне та комп'ютерне моделювання формування суспензії на основі металевих розплавів [1-8, 11, 22]; досліджено та описано нагрівання металевих та неметалевих частинок, що рухаються в полі лазерного випромінювання, встановлено закономірності лазерного нагріву частинки в залежності від швидкості та траєкторії її руху, термодинамічних параметрів частинки, потужності лазерного випромінювання та умов нагріву, кутової швидкості власного обертання частинки та її розмірів [9-10, 18-21]; розроблено рекомендації по використанню раціональних режимів технологічного процесу [5, 7-8, 10-11, 22]. За участю наукового керівника проведено планування експериментальних робіт, сформульовано завдання та висновки роботи, підготовлено матеріали до публікації. Спільно у співавторстві автор брав участь у розробці технологічного обладнання для гібридного лазерно-ливарного методу безперервного отримання дисперсійно-зміщених КМ та проведенні експериментальних досліджень з отримання КМ [12-15, 21].

Дисертаційна робота виконана у відділі концентрованих енергетичних впливів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України під керівництвом докт. техн. наук, професора, завідувача відділом концентрованих енергетичних впливів ФТІМС НАН України Лихошви В. П. Робота є результатом самостійних досліджень дисертанта.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах, та презентувались у збірках наукових праць:

- міжнародна науково-технічна конференція «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций», – Севастополь, 2009;
- IV науково-практична конференція молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні», – Київ, 2012;
- XIII міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2017», – Запоріжжя, 2017;
- XIV міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2018», – Запоріжжя, 2018;
- VII науково-практична конференція молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні», присвячена 60-й річниці ФТІМС НАН України та 100-й річниці Національної академії наук України, – Київ, 2018.
- XV міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2019» – Запоріжжя. – 2019;
- міжнародна науково-практична конференція "Машиностроение и металлообработка" – Могилів та Бобруйськ, Білорусь. – 2019.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 22 наукові праці, у тому числі 11 статей у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданнях іноземних держав), 4 патенти на корисну модель, 7 тез доповідей у збірках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 171 сторінках, складається із вступу, чотирьох основних розділів, основних висновків, додатку та списку використаних джерел з 133 найменувань. Робота містить 51 рисунки, 20 таблиць

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання дослідження, встановлено предмет та об'єкт дослідження, вказано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, сформульовані основні положення, що винесені на захист.

У першому розділі наведено аналіз методів отримання литих КМ та вивчені особливості їх застосування. Показано перспективність застосування концентрованих джерел енергії при отриманні КМ та сформульовано задачі дослідження.

Встановлено, що одним з найперспективніших шляхів вирішення такого важливого науково-технічного завдання, як розробка нового методу безперервного отримання КМ та підвищення фізико-механічних характеристик отриманого матеріалу, є застосування лазерно-ливарного методу. Однак, промислове застосування такого методу ускладняється через відсутність наукових досліджень щодо управління нагрівом частинок в газолазерному потоці та гідро-газодинамічних параметрів процесу, таких як розподіл частинок та концентрація їх в об'ємі розплаву, траєкторії руху частинок в газовому та рідинному потоках, витрати захисного газу, дисперсного матеріалу та розплаву, а також оцінки ступеню впливу швидкості кристалізації на властивості отриманого матеріалу.

Другий розділ присвячено проектуванню та виготовленню устаткування, вибору матеріалів матриці композиту та армуючих частинок, а також розробці методики проведення досліджень.

Для реалізації лазерно-ливарного методу отримання КМ розроблено методику (технологічну схему) проведення експериментальних досліджень, яка передбачає підготовку розплаву в індукційній печі, його подачу в реактор змішування при одночасному введенні в розплав частинок, які піддаються лазерній обробці в газолазерному потоці (рис. 1). Кристалізація розплаву в залежності від швидкості охолодження може відбуватися в кокілї, на металевому барабані або в піщаній формі.

Запропоновано та реалізовано конструкції реакторів змішування (рис. 2), які відрізняються накладанням механічного обертання на реактор змішування, утворенням вихрового руху розплаву внаслідок управління гідродинамікою потоку та обробкою струменя розплаву для формування суспензійного розплаву.

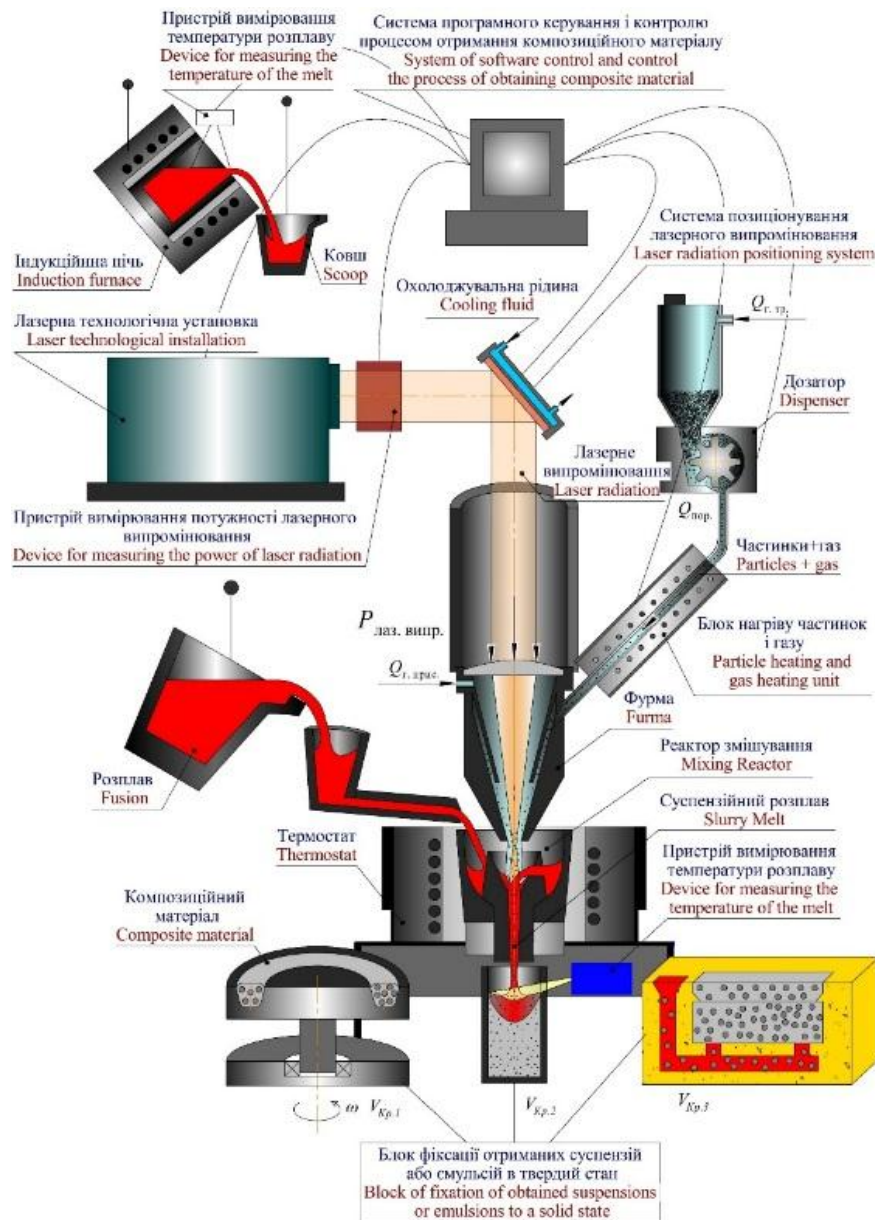


Рис. 1. Схема установки гібридного лазерно-ливарного методу отримання композиційного та пористого матеріалу.

Розроблено методику подачі дисперсного матеріалу в розплав в газолазерному потоці. Для цього розглянуто конструкції фурм, які відрізняються умовами лазерної обробки частинок (на виході із фурми або в самій фурмі), формуванням газопрошкового потоку (ступенем розсіювання частинок по поверхні газової каверни та розмірами самої каверни), а також додатково розроблена нова конструкція фурми з використанням газополум'яного джерела енергії і стисненням потоку.



Рис. 2. Форма та конструкція реакторів змішування (а - з механічним обертанням реактора змішування, б-- з вимушеним обертанням розплаву в реакторі в залежності від гідродинаміки потоку, в - з обробкою струменя розплаву).

Розроблено методику позиціонування фокуса лазерного випромінювання відносно перетяжки газопорошкового потоку для найбільш ефективної обробки

частинок лазерним випромінюванням. В якості матеріалу основи композиту вибрано сплав алюмінію з кремнієм (АК 7) та бронза (ОЦС 5-5-5), армуючі елементи – матеріали на основі металевих (Fe-0,01C% по мас., Р6М5) та неметалевих (WC, SiC) частинок з дисперсністю 150-500 мкм.

У лабораторії на дослідницькій базі ФТІМС НАН України розроблена експериментальна установка, яка включає CO₂-лазер, фурми, дозатор дисперсного матеріалу, термостат, реактор змішування, дозуючий лоток для керованої подачі розплаву, індукційну піч та інше (рис. 1). Температуру розплаву вимірювали хромель - капелієвою термопарою та оптичним пірометром. Моделювання гідро- і газодинамічних процесів формування суспензійного розплаву в реакторі змішування проводили на основі методів чисельної гідрогазодинаміки з використанням двох і трифазної математичної моделі пакета ANSYS CFX (№ 499541). Металографічні дослідження проводили з використанням мікроскопа «МІМ-10» і мікротвердоміра «ПІМТ-3М». Мікро рентгеноспектральний аналіз здійснювали на установці «САМЕСА» з кроком вимірювань 4...11 мкм. Для дослідження процесів плавлення і кристалізації застосували синхронний термічний аналіз (СТА).

У третьому розділі наведені результати теоретичних досліджень реалізації порційних та безперервних технологічних процесів отримання КМ.

На основі досліджень гідродинаміки руху рідини в реакторі з накладанням відцентрових сил визначали форму внутрішніх поверхонь реакторів. Для досліджень обрано геометричні форми: циліндр, еліптичний параболоїд і конус з кутами нахилу твірної щодо вертикальної осі 20° і 45°. Вибір діапазону швидкості обертання здійснювався на дослідженнях утворення воронки. Нижньою межею діапазону є обмеження по об'єму (виплески рідини), а верхньою – стан воронки, при якому можливо потрапляння газу в зливний канал. За допомогою фізичного та імітаційного моделювання визначено оптимальний діапазон швидкостей обертання реактора (від 30 до 160 об/хв), при якому можливо забезпечити виконання умов не переливання рідини через стінки реактора, оптимізацію об'єму рідини та відсутність зон застою. Гідродинамічний стан рухомої рідини визначали по формі кривих, які описують зміну її вільної поверхні в цих реакторах в залежності від витрати газу та швидкості обертання реактора.

Встановлено, що оптимальною формою реактора змішування є форма у вигляді еліптичного параболоїда. Дана форма дозволяє мінімізувати об'єм рідини в реакторі і витримати всі початкові і граничні умови.

Для реалізації безперервного процесу формування суспензійного розплаву проведені дослідження з синхронізації подачі рідини та газопорошкового потоку в реактор змішування при виконанні заданих умов: мінімізації об'єму рідини в ньому та не потрапляння газу в зливний канал.

Для вивчення можливих флуктуацій тиску на виході з фурми і розподілу (розсіювання) порошку по поверхні каверни, розглянуто дві конструкції фурми, в яких передбачено наявність двох газових потоків. Перший потік, який транспортує частинки з постійною витратою, і другий, який прискорює газопорошковий потік з варійованою витратою газу. У першому випадку область змішання потоків винесена за межі фурми, а в другому потоки перетинаються і поєднуються всередині.

В результаті досліджень визначено, що основними факторами які впливають на умову не потрапляння повітря в зливний канал є газо-рідинна область, яка утворена рідинним потоком (параметр H₁), і глибина газової каверни (параметр H₂).

Встановлено, що в інтервалі зміни швидкостей обертання 30-90 об/хв при витраті рідини $1,2 \times 10^{-2}$ кг/с та газу $3,24 \times 10^{-4}$ кг/с головним фактором, що впливає на зміну рівня рідини в реакторі є газо-рідинна область, а в інтервалі 90-160 об/хв - глибина каверни, яка утворена газопорошковим потоком. Для такої витрати рідини та газу виявлено, що розміри параметрів H_1 і H_2 вирівнюються при швидкості обертання ≈ 90 об/хв, що відповідає найменшому об'єму рідини в реакторі. При використанні іншої фурми рівність параметрів H_1 і H_2 зміщується в бік зменшення швидкості обертання і настає при 60 об/хв.

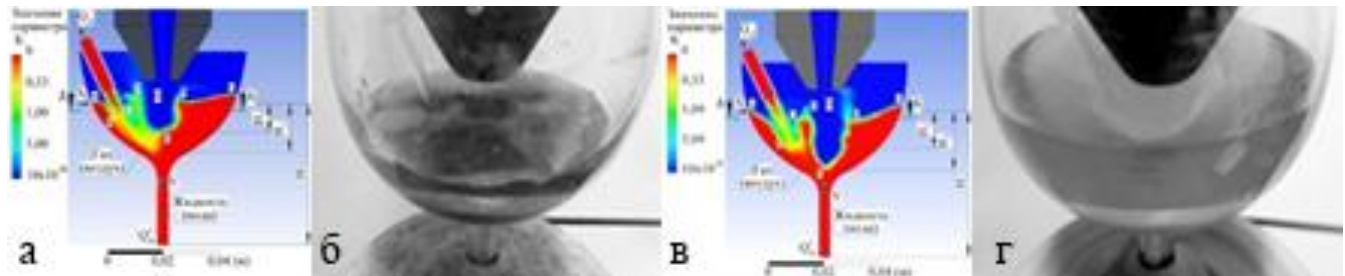


Рис. 3. Результати математичного (а, в) і фізичного (б, г) моделювання стану та поведінки рідини з накладенням обертання і витрат газу ($Q_g = 3,2 \times 10^{-4}$ кг/с) для безперервного процесу наповнення і зливу: а, б – при $\omega = 30$ об/хв; в, г – при $\omega = 160$ об/хв.

Проведено фізичне моделювання на основі модельних рідин, що емітують розплав алюмінію. Зіставлені результати фізико-математичного моделювання з експериментальними та отримана висока збіжність результатів (рис. 3). За результатами досліджень отримана емпірична залежність, яка дозволяє без складних математичних обчислень отримувати значення витрати модельної рідини (Q_p) у залежності від тиску газу на виході з фурми, стаціонарного рівня нерухомої рідини (H) і кутової швидкості реактора змішування (ω).

$$Q_p(P, H, \omega) = 6,86 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{P^2 \cdot H \cdot r}{\eta \cdot g} + 11,42 \cdot \frac{P \cdot \eta}{\rho \cdot g} - 27,63 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P \cdot \eta \cdot H}{\rho \cdot r \cdot g} - \frac{P \cdot \omega \cdot r \cdot \left(1,54 \cdot 10^{-4} \cdot H + 3,96 \cdot 10^{-5} \cdot r \right)}{g} - 1,17,$$

де ρ - густина рідини (2700 кг/м³), η – динамічна в'язкість рідини ($0,01$ Па с), r - радіус зливного отвору ($0,002$ м).

Запропоновано та розроблено нову конструкцію реактора, яка дозволяє змінюючи умови подачі розплаву керувати гідродинамікою формування суспензійного розплаву. Розглянуто вихровий та практично ламінарний рух розплаву в реакторі, визначені умови варіювання подачі розплаву з можливістю зміни напрямку обертання рідини відносно газопорошкового потоку з утворенням воронки при зливі з реактора або без неї.

За результатами імітаційного моделювання представлена форма вільної поверхні рідини та траєкторія руху частинок (рис. 4). Встановлено, що при ламінарному русі розплаву в реакторі, перемішування частинок з розплавом внаслідок відсутності додаткових відцентрових сил ускладнюється занурення частинок в розплав та погіршується їх розподіл в об'ємі. В умовах подачі розплаву з утворенням вихрового руху однаково направлених газопорошкового і рідинного потоків відбувається утворення відцентрових сил та формування воронки в реакторі, що сприяє покращенню умов занурення частинок в розплав. В умовах подачі розплаву з утворенням протилежно направлено вихрового руху рідинного і газового потоків внаслідок дії відцентрових сил та додаткового збурення поверхні

розплаву газовим потоком підвищується зустрічна контактна швидкість частинок і рідинного потоку, що збільшує час взаємодії частинок з розплавом та інтенсифікує процес їх перемішування.

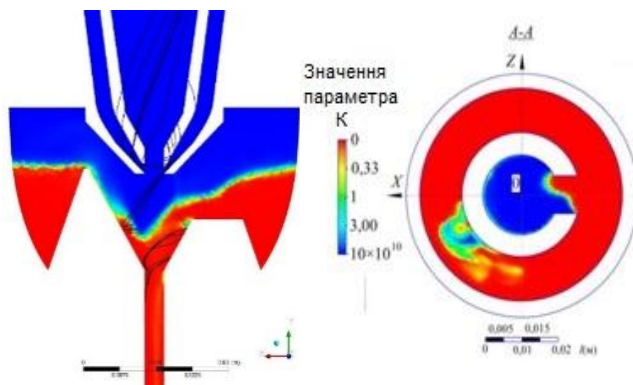


Рис. 4. Розподіл об'ємної концентрації газ-рідина в реакторі змішування з вимушеним перемішуванням розплаву та траєкторії руху сталевих частинок діаметром 500 мкм

500 мкм (рис. 5, б). В даному реакторі формування суспензійного розплаву відбувається без утворення повітряної каверни на поверхні рідини в умовах її синхронізації наповнення та витікання з подачею частинок в газолазерному потоці без закупорювання каналів реактора газом та переповненням рідиною області лазерного впливу.

Важливим аспектом досліджень є позиціонування фокуса лазерного

випромінювання щодо перетяжки газопорошкового потоку для двох фурм, які відрізняються умовами лазерної обробки. Визначено, що для фурми, яка формує широку та не глибоку каверну і забезпечує розсіювання по всій поверхні каверни нагрів частинок необхідно проводити в до фокальній або за фокальній області лазерного випромінювання. Використання такої фурми рекомендовано для частинок, які схильні до процесів коагуляції або коалесценції в розплаві.

Конструкція фурми (рис. 6, б), яка формує вузьку та більш

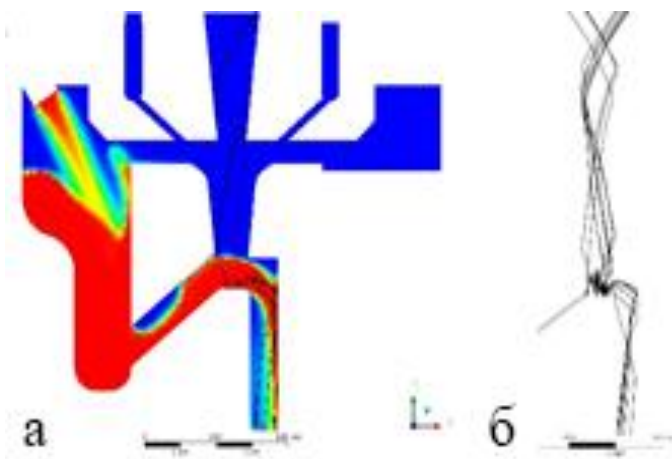


Рис. 5. Розподіл об'ємної концентрації газ-рідина в реакторі з обробкою струменю розплаву (а) та траєкторія руху сталевих частинок діаметром 500 мкм (б).

глибоку каверну дозволяє збільшити відстань від зрізу сопла фурми до поверхні розплаву і підвищити час нагрівання частинки лазерним випромінюванням в газопорошковому потоці. Найбільш ефективна обробка частинок лазерним випромінюванням досягається в перетяжці газопорошкового потоку в фокальній області лазерного випромінювання, що дозволяє обробляти не тільки частинки, але

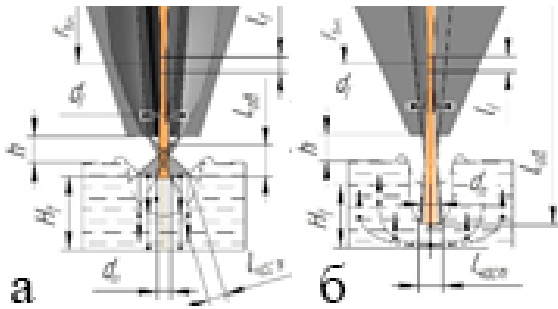


Рис. 6. Схеми розташування фокуса лазерного випромінювання щодо перетяжки газопорошкового потоку для фурми з обробкою частинок: а – на виході, б – починаючи з середини фурми.

і зону розплаву, на яку вони подаються. Дану фурму рекомендовано для частинок з густиною, сумісної або нижче густини розплаву.

Досліджено особливості зміни температури частинок при русі в газопорошковому потоці до зіткнення зі стінкою сопла фурми і після, до потрапляння її в розплав. Отримано залежності температури нагріву частинки від потужності лазерного випромінювання і швидкості руху в газопорошковому потоці.

Нагрів частинки без оплавлення поверхні для швидкості її руху в інтервалі 1-5 м/с представлено у вигляді області заштрихованою похилою прямою (рис. 7, а) та

у всьому діапазоні зміни швидкостей руху частинки від 10 до 25 м/с (рис. 7, б). Область повного плавлення частинки охоплює зону заштрихованою вертикальною лінією (рис. 7, а). Вище цієї області відбувається часткове або повне випаровування.

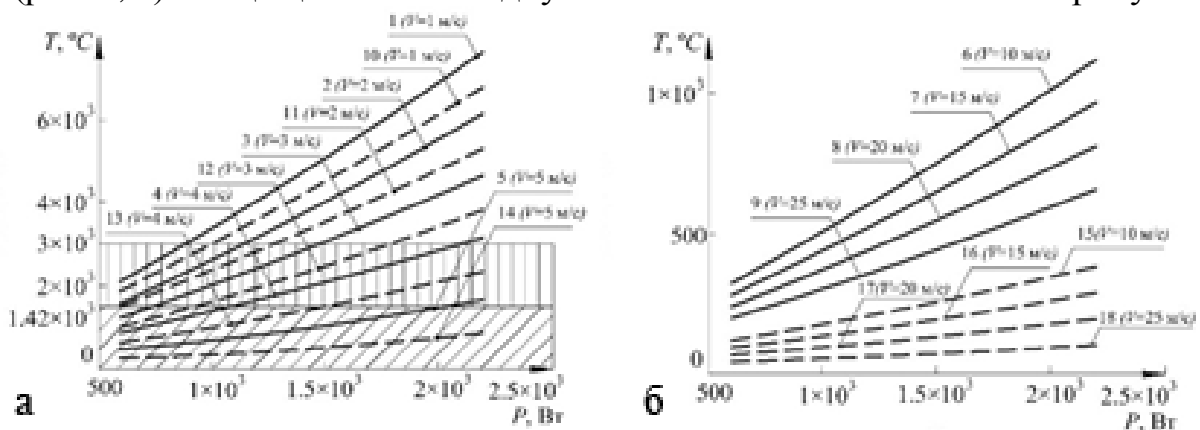


Рис. 7. Зміна температури поверхні сталеві частинки (1-9 опромінена область, 10-18 не опромінена область) в залежності від потужності лазерного випромінювання для інтервалу швидкостей її руху: а: $V = 1-10 \text{ м/с}$, б: $V = 10-25 \text{ м/с}$.

По визначеним розрахунковими методами режимам лазерної обробки (без оплавлення, з частковим оплавленням, і повним плавленням) металеві частинки (Сталь 20, діаметром 315 мкм) проведені експериментальні дослідження з отриманням КМ на основі бронзи ОЦС 555.

Оцінку стану частинок в КМ проводили на основі металографічних досліджень отриманих зразків. При використанні нагріву без оплавлення частинки ($P=1000 \text{ Вт}$, $V=5 \text{ м/с}$) встановлено, що границя з'єднання є досить широкою і розгалуженою унаслідок наявності неметалевих включень на поверхні частинки, а також наявності газової фази у вигляді пор, які можливо спостерігати і в матриці матеріалу (рис. 8, а).

При застосуванні потужності лазерного випромінювання $P = 2100 \text{ Вт}$ і швидкості руху частинки $V = 5 \text{ м/с}$ простежується зменшення ширини границі розділу «частинка-матриця» (рис. 8, б), при цьому візуально виявляється нерівномірність нагріву частинки, що легко визначити по товщині цієї межі.

В інтервалі більш високих температур нагрівання частинки (рис. 8, в), спостерігається її часткове подрібнення, яке відбувається в найбільш нагрітій області частинки. Межа розділу частинки і матеріалу основи стає тоншою.

В умовах введення частинок, нагрітих до рідкого стану в розплав відбувається повне їх подрібнення на більш дрібні металеві включення, які утворюють дрібнодисперсну композицію (рис. 8, г).

На основі металографічних результатів стану частинки в матриці КМ показана адекватність розрахункових та експериментальних значень технологічних параметрів створення КМ лазерно-ливарним методом.

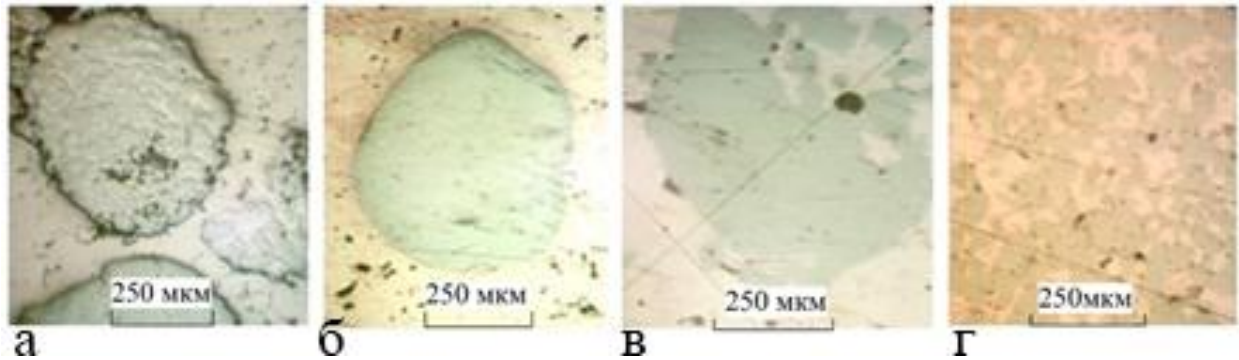


Рис. 8. Форма і фазовий стан частинок в матриці металу (а – $P = 1000 \text{ Вт}$ і $V = 5 \text{ м/с}$, б – $P = 2100 \text{ Вт}$ і $V = 5 \text{ м/с}$, в – $P = 2200 \text{ Вт}$ і $V = 5 \text{ м/с}$, г – $P = 1500 \text{ Вт}$ і $V = 4 \text{ м/с}$).

Процес нагріву частинок супроводжується спільним рішенням двох задач: захистом поверхні частинок і розплаву від окислення та ефективністю їх нагріву лазерним випромінюванням. Для захисту від окислення в більшості подібних процесів використовуються інертні гази. Однак в умовах лазерного нагріву частинок холодний газ знижує їх температуру під дією конвекційного теплообміну. Розроблена лазерно-полум'яна обробка дозволяє збільшити нагрів частинок за рахунок реакції горіння пропану і підвищити ефективність лазерного нагріву за допомогою зниження її відбивної здатності і забезпечить захист поверхні розплаву продуктами реакції. Проведено порівняльні дослідження нагріву гарячим газом, лазерної та лазерно-полум'яної обробкою сталевих частинок діаметром 315 мкм.

Горіння пропану в повітряному середовищі забезпечує нагрів газу до 1000 С і сприяє конвекційному теплообміну між частинками і газом (рис. 9, а), що призводить до підвищення температури частинки (до 311-330 С).

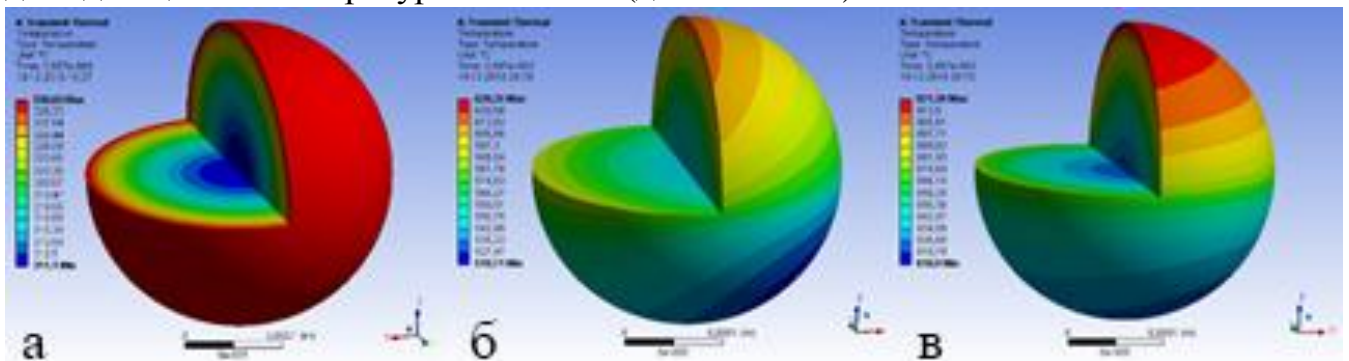


Рис. 9. Температурне поле сталеві частинки в залежності від умов нагрівання: а - конвекційний нагрів, б - нагрів в полі лазерного випромінювання ($P = 800 \text{ Вт}$ і $\varnothing 315$), в – при лазерно-полум'яній обробці ($P = 800 \text{ Вт}$ і $\varnothing 315$).

Раніше доведено, що нижньою границею можливого дифузійного з'єднання частинок з розплавом є температура 800 С, з чого слідує, що їх нагрів внаслідок низьких температур тільки конвекційним теплообміном не може забезпечити якісний зв'язок на границі розділу «матриця-включення».

Для забезпечення дифузійного з'єднання на границі “частинка-розплав” при використанні тільки лазерної обробки необхідно значно підвищувати потужність лазерного випромінювання (рис. 9, б). Лазерно-полум'яна обробка дозволяє підвищити температуру на 300 С і забезпечити умови для отримання якісного дифузійного зв'язку “матриця включення” (рис. 9, в).

В четвертому розділі описано отримання композиційних та пористих матеріалів гібридним лазерно-ливарним методом, розроблена методика та досліджено властивості отриманих зразків. За результатами експериментальної апробації встановлено, що реактор з накладанням механічного обертання рекомендовано для співвідношення густини частинки менше густини розплаву або частинок найменших розмірів, які найважче замішувати в розплав та які потребують тривалого часу взаємодії з розплавом. Реактор з утворенням вихрового руху розплаву рекомендовано для співвідношення густини частинок більше густини розплаву, наприклад на основі алюмінієвого сплаву та армуючих частинок Р6М5 або на основі сплаву бронзи ОЦС 5-5-5 та армуючих частинки WC. Реактор з обробкою струменя розплаву рекомендовано для частинок з густиною, сумісною або дещо вище густини розплаву, який відповідає композиції на основі сплаву бронзи та частинок Р6М5.

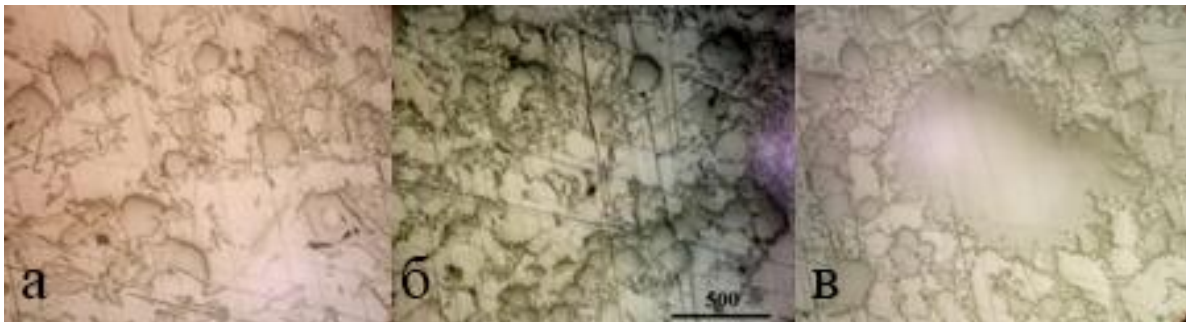


Рис. 10. Мікроструктура композиційних зразків отриманих гібридним лазерно-ливарним методом на основі сплаву АК7, армованого частками сталі Р6М5 діаметром 150 мкм: а – область шліфа з близьким до рівномірного розподілу частинок в розплаві, б – область шліфа з процесами коалесценції частинок в розплаві, в – область шліфа з процесами коагуляції та коалесценції частинок в розплаві

Адекватність використання результатів фізико-математичного моделювання в експериментальних дослідженнях отримання КМ на основі сплаву АК7 і частинок Р6М5 візуально простежується в процесах взаємодії частинок з розплавом. При оптимальних параметрах лазерної обробки частинок і розплаву (рис. 10, а) визначених в процесі математичного моделювання спостерігається якісний зв'язок їх дифузійної взаємодії по границі контакту «включення – матриця». Відхилення від оптимальних параметрів процесу отримання КМ в бік зменшення потужності лазерного випромінювання, часу обробки та інтенсивності перемішування призводить до (рис. 10, б) погіршення якості зв'язку «включення – матриця», появи пористості і зон не з'єднання. Надмірне підвищення потужності лазерного випромінювання призводить до процесів повного плавлення частинок, можливого руйнування (дроблення) та їх коагуляції (рис. 10, в).



Рис. 11. Пористі зразки зі сплаву АК7 отримані при швидкості охолодження: а – 8,25 °C/с, б – 2,5 °C/с та в – залежність зміни густини зразків зі сплаву АК7 отримані на основі ливарного (крива 1) і лазерно-ливарного (крива 2) процесу в залежності від швидкості кристалізації

За допомогою розробленого лазерно-ливарного методу вперше отримано експериментальні зразки пористого матеріалу на основі сплаву АК-7 з рівномірно розподіленими порами, розміри яких залежать від швидкості охолодження (рис. 11).

Встановлено, що внаслідок введення нагрітих лазерним випромінюванням частинок, які містять дрібні газові пори відбулося зміцнення алюмінієвої матриці залізовмісними інтерметалідними включеннями і нерозчиненими частинками заліза.

Сформульований механізм утворення пор, який полягає в тому що при введенні залізної частинки з розгалуженою зовнішньою поверхнею, яка містить дрібні газові пори в своєму об'ємі в розплав в умовах лазерного або спільного нагріву відбувається взаємодія цієї частинки з розплавом, а газ з її пор стає центрами пороутворення в матриці розплаву.

Проведено дослідження зміни густини зразків зі сплаву АК7 одержаних ливарним та гібридним лазерно-ливарним методами в залежності від швидкості затвердіння (рис. 11, в). Встановлено, що зі збільшенням швидкості затвердіння в процесі отримання пористого матеріалу зменшується його густина в порівнянні з литими зразками. При швидкості затвердіння 8,25°C/с густина матеріалу становить 2,24 г/см³, а при швидкості затвердіння 2,5°C/с густина – 2,45 г/см³. В умовах затвердіння зі швидкістю 8,25 °C/с пористість дрібна (розміри пор становлять від 10 до 250 мкм), рівномірно розподілена. Зменшення швидкості затвердіння (до 2,5 °C/с) інтенсифікує процеси коагуляції (розміри пор складають від 100 до 900 мкм) та часткового видалення великих пор, що призводить до зниження газонасиченості сплаву.

Проведено металографічні та мікрорентгеноспектральні дослідження литих зразків, зразка з КМ та пористих зразків на основі матричного сплаву АК7. В результаті досліджень фазового складу у всіх зразках встановлено наявність наступних фаз: (Al), Si, β - FeSiAl₅, α - (FeMn)₃Si₂Al₁₅, Si + (Al), θ - CuAl, Mg₂Si, W - CuMgSi₆Al₅, π - FeMg₃Si₆Al₈. При цьому у пористих зразках відбулося збільшення Fe в складі, як залізовмісних інтерметалідних включень, так і в евтектиці Al + Si і твердому розчині (Al). Також в цих зразках виявлені частково розчинені частинки заліза. Збільшення швидкості затвердіння для всіх зразків не залежно від способу отримання призводить до подрібнення кристалів (Al) - фази і інтерметалідних включень. Для зразка з КМ характерно рівномірно розташовані не розчинні частинки Р6М5 по всій області шліфа зразка.

На основі досліджень мікротвердості фаз зразків отриманих ливарним та лазерно-ливарним методами встановлено, що для всіх зразків одержаних зі

швидкістю кристалізації $V_{кр.} = 2,5^{\circ}\text{C/с}$, отримані значення основних фаз не відрізняються і становлять: β - фаза 280 - 350 НВ; α - фази 480 - 510 НВ; Al + Si - фаза 150 - 180 НВ; і Al - фази 75-80 НВ. Для зразка з КМ мікротвердість армуючих частинок в матриці литого композиту складає 50-55 HRC. Вимірювання мікротвердості залізної частинки пористого зразка, яка повністю не розчинилась в матриці матеріалу складає 505-550 НВ.

В зразках одержаних зі швидкістю кристалізації $8,25^{\circ}\text{C/с}$ внаслідок більш дрібної структури мікротвердість окремих фаз виміряти неможливо. Тому визначено середню мікротвердість зразків по декількох точках, які охоплюють ці фази. Вона також ідентична для цих зразків і складає 350-370 НВ.

Встановлено, що твердості пористих зразків залежить від швидкості затвердіння при їх отриманні. Твердість пористого зразка отриманих при швидкості $2,5^{\circ}\text{C/с}$ становить 60 НВ, а при швидкості затвердіння $8,25^{\circ}\text{C/с}$ рівно 90 НВ. Отже твердість пористих зразків отриманих лазерно-ливарним методом залежить від їх розмірів, кількості і розподілу. Вимірювання твердості зразка з композиційного матеріалу отриманого лазерно-ливарним методом показало найбільше значення і складає 150-170 НВ.

Проведені експериментальні дослідження зносостійкості в умовах сухого тертя. Параметри випробувань склали: навантаження 200 г, відстань 8 км, лінійна швидкість 1 м/с, матеріал контр тіла СЧ 25.

Отримані данні показують, що для зразка із КМ втрата ваги найменша і складає 0,0026 г, що в 2 і 2,1 рази менше порівняно з литими зразками. Проте втрата ваги контр тіла під час випробувань з використанням композиційного зразка в 1,6 і 1,56 разів перевищує втрату ваги контр тіла з використанням литих зразків. Таким чином для використання матеріалу з композиційного зразка рекомендовано вибір контр тіла більшої твердості. Для пористих зразків втрата ваги в 1,6 і 2 разів менша ніж у литих зразках відповідно. При цьому втрата ваги контр тіла для пористих зразків порівняно із литими зразками також менша в 1,26 и 1,25 рази.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Вперше запропоновано, обґрунтовано та реалізовано гібридний лазерно-ливарний метод безперервного отримання литого композиційного матеріалу, в основу якого покладено використання ливарних процесів і лазерної обробки.

2. Запропоновано та реалізовано конструкції реакторів змішування, де відбувається безперервне формування металевої суспензії в залежності від фізико-хімічних параметрів частинок і розплаву, які відрізняються: накладанням механічного обертання на реактор змішування з можливістю керування інтенсивністю замішування та кількістю частинок, які вводяться в розплав (примусове перемішування розплаву); утворенням вихрового руху розплаву внаслідок управління гідродинамікою потоку та зменшенням об'єму розплаву в реакторі (вимушене перемішування розплаву); газолазерною обробкою рухомого струменя розплаву.

3. На основі проведеного фізико-математичного моделювання гідро-, газодинамічних процесів формування суспензійного розплаву в реакторах змішування вперше отримано залежності зміни форми вільної поверхні і швидкості витікання рідини з реактора від витрати рідинного і газових потоків, що подаються в реактор, а також способу замішування. Для лазерно-ливарного процесу отримання

КМ на основі силуміну АК 7 та бронзи ОЦС 5-5-5 з композиційною складовою до 10% в об'ємі розплаву визначено оптимальні інтервали значень витрати рідини ($(Q_{\text{рід}}) 0,01 \dots 0,03 \text{ кг/с}$), газу ($(Q_{\text{г}}) 1,467 \times 10^{-4} \dots 4,1 \times 10^{-4} \text{ кг/с}$) та дисперсного матеріалу ($(Q_{\text{час.}})$).

4. Для реактора з примусовим перемішуванням розплаву визначені оптимальні швидкості обертання, які складають $60 \dots 160 \text{ хв}^{-1}$, що забезпечує розподіл частинок по всьому об'єму розплаву. Зниження швидкості обертання реактора від 60 до 30 хв^{-1} незважаючи на зменшення тенденції накопичення частинок в застійних зонах розплаву і утворення самих застійних зон, сприяє утворенню процесів коагуляції частинок в розплаві.

5. Для реактора, що забезпечує утворення вихрового руху розплаву, визначено умови варіювання подачі розплаву з можливістю зміни напрямку обертання рідини відносно газопорошкового потоку, які дозволяють покращити взаємодію частинки з розплавом для отримання якісного зв'язку.

6. Конструкція реактора з обробкою струменю розплаву дозволяє підвищити ефективність введення частинок в розплав і їх взаємодію за рахунок підвищення інтенсивності лазерної обробки та зменшення області формування металевої суспензії. Встановлені гідродинамічні особливості формування суспензії при різних співвідношеннях густини частинки та розплаву.

7. На основі розрахунків для двох фурм, які відрізняються умовами лазерної обробки частинок (на виході із фурми або в самій фурмі) представлені найбільш ймовірні траєкторії руху частинок в її внутрішніх каналах та на виході із них, які охоплюють весь спектр розподілу основної маси частинок в газолазерному і рідинному потоках. Для кожної із фурми визначено положення фокуса лазерного випромінювання відносно перетяжки газопорошкового потоку, що забезпечує вибір оптимальних параметрів обробки частинок в дофокальній, фокальній чи зафокальній області лазерного випромінювання.

8. Досліджено динаміку зміни фронту плавлення частинки в залежності від швидкості ($0-25 \text{ м/с}$) та траєкторії її руху, потужності лазерного випромінювання $600 \dots 2500 \text{ Вт}$, кутової швидкості власного обертання, термодинамічних параметрів та геометричних розмірів (для частинок діаметром 150 мкм , 315 мкм і 500 мкм). Порівняно результати лазерної обробки металевих (Fe - 0,01C%, P6M5) та неметалевих частинок (WC, SiC), встановлено особливості їх нагріву та визначені оптимальні параметри лазерного випромінювання, які дозволяють досягати часткового оплавлення частинок. Отримані результати розподілу температури нагріву частинки дозволяють керувати режимом її лазерної обробки без оплавлення, з частковим і повним плавленням.

9. В якості заміни використання інертних газів та підвищення ефективності лазерного нагріву частинок запропоновано процес гібридної лазерно-полум'яної обробки з використанням суміші газів «повітря-пропан». В умовах використання даної обробки визначені оптимальні параметри процесу формування газопорошкового потоку із співвідношенням витрат 3:1 повітря-пропан, що забезпечує додатковий нагрів частинок в потоці і створює захисне середовище з продуктів реакції горіння.

10. За результатами експериментальної апробації підтверджено ефективність застосування реакторів з накладанням механічного обертання, утворенням

вихрового руху розплаву та газолазерною обробкою струменя розплаву для отримання дисперсно-армованого матеріалу на основі алюмінієвих і мідних сплавів.

11. Для розробленого лазерно-ливарного методу встановлена можливість отримання пористого матеріалу з рівномірно розподіленою пористістю в матриці алюмінієвого сплаву (пористість матеріалу складає 5-17%). Встановлені закономірності зміни густини отриманого пористого матеріалу, кількості та розмірів пор в залежності від швидкості кристалізації розплаву.

12. Шляхом проведення експериментальних досліджень зносостійкості в умовах сухого тертя встановлено, що для зразка із одержаних КМ втрата ваги приблизно вдвічі менша порівняно зі зразками, одержаними традиційним ливарним методом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Найдек В.Л. Распределение дисперсных частиц в двухфазном газолазерном потоке / В.Л. Найдек, В.П. Лихошва, Е.А. Рейнталь, Ф.И. Кирчу, А.П. Шатрава, Л.А. Бондарь, В.П. Сердобольская, А.Н. Тимошенко // Металл и литье Украины. – 2009. – № 11-12. – С. 4-7. *Дисертантом розглянуто декілька конструкцій газолазерних фурм та проведені експериментальні дослідження формування газопорошкових потоків в внутрішніх каналах фурм та на виході із них.*

2. Лихошва В.П. Моделирование газолазерных потоков при создании оборудования для нагревания дисперсных материалов / В.П. Лихошва, Е.А. Рейнталь, Ф.И. Кирчу, А.П. Шатрава, Л.А. Бондарь, А.Н. Тимошенко // Металл и литье Украины. – 2009. – № 11-12. – С. 77-81. *Дисертантом проведено імітаційне моделювання при різних співвідношеннях витрати газів та встановлено особливості формування газопорошкових потоків для різних конструкцій газолазерних фурм.*

3. Лихошва В.П. Воздействие газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, на жидкие среды / В.П. Лихошва, Е.А. Рейнталь, Л.А. Бондарь, А.Н. Тимошенко, Л.Е. Угрин // Процессы литья. – 2010. – №6 – С. 64-71. *Дисертантом проведено комп'ютерне моделювання формування газових каверн у рідині при різних співвідношеннях витрати газів в каналах фурми та отримано оптимальні параметри.*

4. Рейнталь Е.А. Изменение газовой каверны при погружении фурм различных конструкций в жидкие среды / Е.А. Рейнталь, В.П. Лихошва, В.В. Савин, Л.А. Бондарь, А.Н. Тимошенко, Р.С. Надашкевич // Процессы литья. – 2011. – №6. – С. 14-23. *Дисертантом проведені дослідження формування каверн при заглибленні газових потоків у рідкі середовища та проведено фізико-математичне моделювання даного процесу.*

5. Лихошва В.П. Форма свободной поверхности жидкости в реакторах смешения в условиях наложения механического и пневматического воздействий / В.П. Лихошва, А.Н. Тимошенко, Е.А. Рейнталь, Л.А. Бондарь // Процессы литья. – 2012. – №5 – С. 25-32. *Дисертантом методами фізико-математичного моделювання досліджено зміну форми вільної поверхні рідини в реакторі змішування в залежності від накладання механічного обертання та тиску газу на поверхню рідини; розглянуто декілька форм реакторів змішування де відбувається формування суспензії, проведено мінімізацію об'єму рідини в реакторі та визначена його оптимальна форма.*

6. Лихошва В.П. Моделирование динамики движения частицы на границе газ-жидкость и в жидких средах / В.П. Лихошва, Е.А. Рейнталь, Л.А. Бондарь, А.Н.

Тимошенко // Процессы литья. – 2012. – №6. – С. 65-71. *Дисертантом проведено імітаційне моделювання процесу зміни динаміки руху частинки на межі газ-рідина для різних співвідношень її густини та модельної рідини.*

7. Лихошва В.П. Новые гибридные методы формирования суспензионных расплавов в литейном производстве с применением лазерной обработки / В.П. Лихошва, А.Н. Тимошенко, Е.А. Рейнталь, Л.А. Бондарь // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 3. – С.3 – 8. *Дисертантом розроблено схему та методами фізико-математичного моделювання досліджено безперервне формування суспензійного розплаву в реакторі змішування при накладанні відцентрових сил на реактор та тиску газу на поверхню рідини, проведено порівняння експериментальних та теоретичних досліджень. (Іноземне видання).*

8. Лихошва В.П. Получение суспензионных металлических расплавов с использованием лазерного излучения / В.П. Лихошва, А.Н. Тимошенко, Л.А. Бондарь // Metallurgia машиностроения. – 2014. – № 6. – С. 34 – 37. *Дисертантом проведено модернізацію реактора змішування та визначено оптимальні параметри процесу формування суспензії. (Іноземне видання).*

9. Лихошва В.П., Динамика нагрева металлических частиц, движущихся в поле лазерного излучения / В.П. Лихошва, А.Н. Тимошенко, Л.В. Мосенцова, В.В. Савин // Процессы литья. – 2017. – №6 – С. 44-53. *Дисертантом проведено імітаційне моделювання лазерного нагріву сталльної частинки та встановлені режими обробки частки лазерним випромінюванням: без оплавлення, з частковим оплавленням і повним її плавленням.*

10. Lykhoshva V. Temperature Distribution of Particles in a Laser Beam / Lykhoshva V., Tymoshenko A., Mosentsova L., Savin V., Schitz D. // Iranian Journal of Materials Science and Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. – 2018. – Volume 15 (Issue 1). – pp. 1-8. URL:<http://ijmse.iust.ac.ir/article-1-1030-en.html>. *Дисертантом досліджено розподіл температурного поля на поверхні і в об'ємі частинки, яка переміщається в полі лазерного випромінювання при різних швидкостях руху. (Іноземне видання)*

11. Lykhoshva V. The Application of the Hybrid Method the Powder-Laser-Casting Technology for Production of Porous Alloys Based on Aluminum / Lykhoshva V., Savina L., Savin V., Tymoshenko A. // Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials. – 2019. – Vol. 31. – pp. 11-15. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JMNM.31.11>. *Дисертантом на основі лазерно-ливарного методу розроблено та досліджено новий процес отримання пористого матеріалу на основі алюмінієвого сплаву з рівномірно розподіленою пористістю.*

12. Патент на корисну модель № 72692 UA МПК C22C1/02 (2006.01). Спосіб отримання композиційних матеріалів / Лихошва В.П., Афтандіянц Є.Г., Рейнталь О.О., Надашкевич Р.С., Тимошенко А.М., Головка Л.Ф., Шатрава О.П. – № u201201812; опубл. 27.08.2012., Бюл. № 16/2012. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель для отримання композиційних матеріалів в умовах подачі армуючих частинок в газовому потоці у розплав із застосування лазерного випромінювання.*

13. Патент на корисну модель № 79754 UA, МПК B23K 26/14 (2006.01), B22D19/00. Пристрій для лазерної обробки / Лихошва В.П., Афтандіянц Є.Г., Рейнталь О.О., Тимошенко А.М., Головка Л.Ф. – № u201213707; опубл. 25.04.2013.,

Бюл. № 8/2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель пристрою для подачі в зону лазерної обробки дисперсійного матеріалу.*

14. Патент на корисну модель № 81108 UA, МПК B22D19/00, B22D19/14 (2006.01). Пристрій для отримання композиційних матеріалів / Лихошва В.П., Афтандіянц Є.Г., Рейнталь О.О., Тимошенко А.М., Головка Л.Ф. – № u201213709; опубл. 25.06.2013., Бюл. № 12/2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель пристрою отримання композиційного матеріалу з використанням лазерного випромінювання.*

15. Патент на корисну модель № 82839 UA, МПК B22D19/14 (2006.01), C22C1/02 Спосіб отримання композиційних матеріалів / Лихошва В.П., Афтандіянц Є.Г., Рейнталь О.О., Тимошенко А.М., Головка Л.Ф. – № u201302220; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15/2013. *Дисертантом зареєстровано патент на корисну модель способу отримання композиційних матеріалів шляхом подачі армуючих частинок в суспензії (частинки+рідина) під дією лазерного випромінювання з подальшим введенням їх в розплав.*

16. Тимошенко А. Н. Зміна форми вільної поверхні рідини в реакторі змішування під механічним та пневматичним впливом // Металознавство та обробка металів: Матеріали IV науково-практичної конференції молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні». – Київ, 8-9 жовтня 2012р. – № 4. – С. 48.

17. Лихошва В.П., Тимошенко А.Н. Получение пористого материала на основе алюминиевого расплава гибридным литейно-лазерным методом / В.П. Лихошва, А.Н. Тимошенко // Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2017». – Запоріжжя, 23-25 травня 2017р. – С. 162-163.

18. Тимошенко А.Н., Моделирование нагрева частиц в условиях лазерного и гибридного лазерно-пламенного нагрева / А.Н. Тимошенко, В.П. Лихошва, М.И. Голубчик // Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2018». – Запоріжжя, 22-24 травня 2018р. – С. 189-191.

19. Тимошенко А. Н., Підвищення ефективності введення дисперсного матеріалу в розплав за умов лазерної обробки // Металознавство та обробка металів: Матеріали VII науково-практичної конференції молодих вчених України «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні». – Київ, 29-30 травня 2018р. – № 3. – С. 30-31.

20. Тимошенко А.Н., Лихошва В.П., Пеликан О.А. Имитационное моделирование нагрева металлических и неметаллических частиц в условиях лазерной и химикотермической обработке // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2019» – Запоріжжя, 2019. – С. 198-199.

21. Тимошенко А.М., Лихошва В.П., Голубчик М.І. Позиціонування лазерного випромінювання відносно перетяжки газопорошкового потоку для підвищення ефективності лазерного нагріву частинок // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2019». – Запоріжжя, 2019. – С. 199-200.

22. Тимошенко А.Н., Лихошва В.П., Голубчик М.И. Лазерно-литейный метод получения дисперсно-упрочненных композиционных материалов // Международная научно-практическая конференция "МАШИНОСТРОЕНИЕ И

МЕТАЛЛООБРАБОТКА". – Могилев-Бобруйск, Беларусь. –2019. – С. 99-100.
URI: <http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/10755>

АНОТАЦІЯ

Тимошенко А.М. Високоєфективний лазерно-ливарний процес отримання широкої гами композиційних матеріалів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2020.

Дисертація присвячена розробці нового гібридного методу безперервного отримання литих дисперсно-змішаних композиційних матеріалів, який дозволяє поєднати переваги використання концентрованих джерел енергії з високоєфективними традиційними ливарними технологіями. Метод базується на формуванні суспензії в реакторах змішування за умови безперервної подачі розплаву, який є основою композиційного матеріалу, та газопорошкового потоку при одночасній обробці частинок і розплаву лазерним випромінюванням. В подальшому одержаний суспензійний розплав піддається керованому затвердінню. Робота охоплює широке коло питань щодо досліджень впливу газодинамічних, гідродинамічних та теплофізичних процесів на формування суспензії при взаємодії лазерного випромінювання з частинками, які вводяться в металевий розплав. Обґрунтовано доцільність використання лазерного випромінювання при отриманні композиційного матеріалу різними технологічними прийомами перемішування розплаву та армуючих частинок, що забезпечує їх нагрів в газолазерному потоці, інтенсифікацію процесів перемішування в об'ємі розплаву та дозволяє отримати якісний зв'язок між армуючими елементами і матрицею литого композиційного матеріалу.

Ключові слова: лазерно-ливарний метод, лазерне випромінювання, литий композиційний матеріал, реактор змішування, суспензійний розплав, комп'ютерне моделювання, нагрів частинки.

АННОТАЦИЯ

Тимошенко А.М. Высокоэффективный лазерно-литейный процесс получения широкой гаммы композиционных материалов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 - процессы физико-технической обработки. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, г. Киев, 2020.

Диссертация посвящена разработке нового гибридного метода непрерывного получения литых дисперсно-упрочненных композиционных материалов, который позволяет совместить преимущества использования концентрированных источников энергии с высокоэффективными традиционными литейными технологиями. Метод основан на формировании суспензии в реакторах смешения при непрерывной подаче расплава, который является основой композиционного материала, и газопорошкового потока при одновременной обработке частиц и расплава лазерным излучением. В дальнейшем полученный суспензионный расплав

подвергается управляемому затвердеванию. Работа охватывает широкий круг вопросов по исследованию влияния газодинамических, гидродинамических и теплофизических процессов на формирование суспензии при взаимодействии лазерного излучения с частицами, которые вводятся в металлический расплав. Обоснована целесообразность использования лазерного излучения при получении композиционного материала различными технологическими приемами перемешивания расплава и армирующих частиц, что обеспечивает их нагрев в газолазерной потоке, интенсификацию процессов перемешивания в объеме расплава и позволяет получить качественную связь между армирующими элементами и матрицей литого композиционного материала.

Ключевые слова: лазерно-литейный метод, лазерное излучение, литой композиционный материал, реактор смешения, суспензионный расплав, компьютерное моделирование, нагрев частицы.

ANNOTATION

Tymoshenko AM Highly effective laser-foundry process for obtaining a wide range of composite materials. - Manuscript.

The dissertation is devoted to the development of a new hybrid method for the production of cast dispersion reinforced composite materials, which combines the advantages of using concentrated energy sources with highly effective traditional casting technologies. The method is based on the formation of a suspension melt reinforced with metal (or non-metal) particles under the action of laser radiation. The work covers a wide range of issues related to research on the influence of gas-dynamic, hydrodynamic, and thermophysical processes in the formation of a suspension based on a metallic melt, and interaction of laser radiation with added to the melt particles.

In the study, the designs of mixing reactors have been proposed and implemented, where the continuous formation of a metal suspension takes place, which differs: by imposing mechanical rotation on the reactor with the ability to control the number of particles added to the melt and the intensity of their mixing (forced mixing of the melt); the formation of a vortex motion of the melt as a result of controlling the hydrodynamics of the flow and a decrease in the volume of the melt in the reactor (compelled mixing of the melt); the processing of a moving stream of melt.

For the hybrid laser-casting method, the designs of tuyeres are considered, which differ in the conditions of laser processing of particles (at the exit from the tuyere or in the tuyere itself) and the formation of a gas-flux flow (the degree of particle scattering over the surface of the gas cavity and the size of the cavity itself). We investigate the features of the change in the temperature of particles during movement in a gas-powder flow before the collision with the lance nozzle wall and before it enters the melt and obtained the dependences of the particle heating temperature on the laser radiation power and the speed of movement in the gas-powder flow.

To reduce the use of inert gases and increase the efficiency of laser heating of particles, a hybrid laser-flame treatment process is proposed. A tuyere design with the laser-flame treatment of particles has been developed, which makes it possible to increase their heating due to the reaction of propane combustion and to increase the efficiency of laser heating by reducing the reflectivity, as well as to provide protection of the melt surface with reaction products. The temperature distribution over the surface and in the volume of

the particle is investigated depending on the physical and thermodynamic parameters of the particle material, its speed of movement, and processing conditions.

Experimental testing has confirmed the effectiveness of the use of the laser casting method for obtaining a dispersion-hardened composite material based on aluminum and copper alloys. Based on the metallographic results of the state of the particle in the matrix of the material, the adequacy of the calculated and experimental values of the technological parameters for creating composite materials by the laser casting method is shown.

The developed laser casting method opens up the possibility of obtaining a porous material with a uniformly distributed porosity in the aluminum alloy matrix. The mechanism of pore formation was formulated: when an iron particle with a branched outer surface is added to the melt, which contains small gas pores in its volume during laser treatment, the gas from pores becomes the centers of pore formation in the melt matrix. The influence of the method of solidification of the melt on the number and size of pores was investigated which made it possible to control the density of the obtained porous material depending on the rate of crystallization.

Here we demonstrate the expediency of using laser radiation for the production of composite material using various techniques for mixing the melt and reinforcing particles, which provides their heating in the gas laser flow, intensifying the mixing processes in the volume of the melt and allows obtaining a qualitative bond between the reinforcing elements and the matrix cast composite material.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.03.07 - Processes of physical and technical processing. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2020.

Keywords: laser-foundry method, laser radiation, cast composite material, mixing reactor, suspension melt, computer simulation, particle heating

Підписано до друку 12 жовтня 2020р.
Формат 60х90^{1/16}. Папір офсетний. Друк різнографічний.
Кількість умовних друкованих аркушів 0,9
Тираж 120 екз. Замовлення № .
Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру №620049
13.10.2008,
ПРІНТЦЕНТР, м. Київ, вул. Політехнічна, 16